doi: 10.12011/1000-6788-2018-1504-11 中图法分类号: F244.33 文献标志码: A

复杂产品研发项目技术风险扩散建模与仿真

杨乃定, 李芮萌, 张延禄, 刘 慧

(西北工业大学 管理学院, 西安 710129)

摘 要 通过识别复杂产品研发项目中任务间功能关联和组织任务间执行关联, 建立基于技术关联的研发项目组织 - 任务相依网络模型. 在此基础上, 分析技术风险事件发生时组织任务间相互作用机理, 构建复杂产品研发项目技术风险扩散动力学模型, 并针对由少数任务引发的技术风险扩散进行仿真. 结果表明: 少数任务引发的技术风险扩散会在短时间内造成较大影响, 扩散过程经历缓慢扩散, 失控扩散, 最终达到相对稳定状态; 扩散范围与组织网络规模呈近似 "倒 U" 型关系; 组织网络规模一定时, 组织任务间执行关联越均匀, 相依网络鲁棒性越差; 存在最佳风险资源投入量使得技术风险的影响范围保持在最低水平; 不同袭击策略对技术风险扩散的影响没有明显差异. 研究成果丰富了风险扩散动力学理论, 对提高复杂产品研发项目抗风险能力提供建议.

关键词 研发项目; 复杂产品; 相依网络; 技术风险; 风险扩散

Modeling and simulation of technical risk diffusion in the complex product research and development projects

YANG Naiding, LI Ruimeng, ZHANG Yanlu, LIU Hui

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract This paper generates an organization-task interdependent network model based upon functional dependence between tasks and executive dependence between organizations and tasks in an complex product research and development (R&D) project. Then it develops and simulates the dynamic model of technical risk diffusion by analyzing the interaction between organizations and tasks when facing with technical risks. The results show that the technical risk diffusion caused by a few tasks can significantly turbulent the network in a short time; the diffusion process has three stages: slow stage, out of control stage, and relatively stable stage; the relationship between the organization network scale and the consequence of diffusion shows approximate "inverse U" shape; the more even executive dependence, the weaker the robustness of the network when fixes the number of organizations; there exists a best level of resource input which makes the impact of diffusion remain at the lowest level; there is no significant difference in the diffusion process under different attack strategies. This research riches the dynamic theory of risk diffusion, and has provided reference for optimization of complex product development project architecture and improving the risk resisting capacity of R&D projects.

Keywords R&D project; complex product; interdependent network; technical risk; risk diffusion

收稿日期: 2018-08-03

作者简介: 通信作者: 杨乃定 (1964–), 男, 汉, 陕西人, 教授, 博士, 研究方向: 风险管理, 管理系统工程, 项目管理等, E-mail: naidingy@nwpu.edu.cn; 李芮萌 (1989–), 女, 汉, 辽宁人, 博士研究生, 研究方向: 研发项目风险管理, 复杂网络等.

基金项目: 国家自然科学基金 (71471146, 71501158, 71871182); 中央高校基本科研业务费专项资金 (3102018JCC013)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (71471146, 71501158, 71871182); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3102018JCC013)

中文引用格式: 杨乃定, 李芮萌, 张延禄, 等. 复杂产品研发项目技术风险扩散建模与仿真 [J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(6): 1496–1506.

英文引用格式: Yang N D, Li R M, Zhang Y L, et al. Modeling and simulation of technical risk diffusion in the complex product research and development projects[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2019, 39(6): 1496–1506.

中国系统工程学会第 20 届学术年会推荐论文.

1 引言

复杂产品研发项目是将产品研发各相关过程进行集成并行的多环节复杂系统 [1], Hobday 将其定义为高成本、工程密集且承担一定创新工作的复杂网络. 为实现研发目标, 组织需要运用庞大的知识与技术体系对数量巨大的研发任务 (子产品、组件或包等) 进行设计、测试与集成 [2,3], 这使得单一组织难以独自完成复杂产品的研发. 因此, 多主体结成网络共同研发已经成为复杂产品研发的主要形式 [4]. 例如, 我国自主研发的大飞机 C919 就是由 200 多家企业和 30 多所高校建立研发网络合作研发. 然而, 研发网络虽然可以有效整合互补资源, 提高研发效率, 但同时也不可避免地增加了技术风险的管理难度 [5]. 技术风险是复杂产品研发项目面临的最主要的风险之一, 产品性能无法满足研发要求是引发技术风险的主要风险事件 [6], 最终可能导致研发失败. 研发的失败往往并非源于所有任务同时失败, 而通常是由少数研发任务的失败诱发的 [7−9]. 研发项目的各项任务间存在着错综复杂的功能依赖关系 [10], 因此当某项研发任务发生技术风险 (事件) 时, 可能会导致对其依赖的任务因缺乏关键技术或组件而发生技术风险 (事件), 从而引发技术风险的 "涟漪效应" [11]. 随着研发网络中组织数量的增多和任务重叠度的增大, 任务间协调难度加大, 进一步加剧了技术风险影响的范围与程度, 严重干扰复杂产品研发活动的正常进行 [12,13]. 现实的复杂产品研发项目中, 少数任务发生技术风险事件的可能性极大, 但由于最初影响较小易被管理者忽视, 待察觉时, 风险往往已经扩散开来, 难以控制. 因此, 为了对复杂产品研发项目的技术风险进行有效控制, 有必要对由少数任务引发的技术风险扩散规律进行研究.

目前, 针对技术风险的研究主要是从静态角度围绕技术风险内涵界定、风险因素和类型识别、风险评估等问题展开 [6,14], 对网络化背景下技术风险的动态扩散特征研究不足, 尚处在起步阶段. 少量动态风险扩散的研究主要分别从组织网络和任务网络两个视角针对不同类型的风险扩散规律进行研究. 组织网络视角的研究主要有 Zhang 等 [15−17] 首次将复杂网络级联失效模型引入研发网络风险扩散模型中, 建立了研发网络风险扩散问题的研究框架. 在此基础上, 铁瑞雪等 [18] 从项目运行过程角度将技术风险分为战略性、组织性和实现性技术风险, 并基于传染病 (SIR) 模型分析了以上三种类型技术风险的传播规律. 任务网络视角下, 现有研究主要根据任务间功能关联或时序关联建立任务网络, 并针对产品研发过程中的设计变更风险 [11]、返工风险 [19], 工期风险 [20−22] 和系统性风险 [7] 等风险的扩散规律进行研究. 然而, 上述研究均忽略了组织和任务间相互作用对风险扩散的影响.

相依网络理论是复杂网络理论的一个重要分支, 最早由 Buldyrev 等人提出. 该理论强调单个网络在表示现实网络中不同种类元素间相互作用关系上具有局限性 [23], 因此 Buldyrev 率先建立了一种一对一依赖的相依网络模型 [24]. 在此基础上, 众多学者基于相依网络模型研究了网络间关联类型 [25,26]、关联概率 [27]、关联偏好 [28] 等因素对相依网络性能的影响. 在复杂产品研发项目中, 当研发任务发生技术风险 (事件) 时, 组织与任务间主要存在着两类相互作用. 一方面任务发生风险 (事件) 会增加组织的风险, 导致组织执行能力降低, 反过来影响组织内其他任务的研发 [29]; 另一方面, 组织会运用自身资源对技术风险进行控制, 并对已经发生技术风险 (事件) 的任务进行恢复 [18]. 复杂产品研发组织网络与任务网络具有复杂网络中相依网络的结构特征, 而二者在技术风险干扰下的状态转变与相依网络级联失效现象具有高度的相似性. 然而, 目前相依网络的研究大多假定相依网络具有相同的规模, 且主要认为当网络中的某一节点失效后, 相依节点即刻失效. 已有研究在相依节点间作用强度和恢复情况对级联失效过程的影响方面存在不足.

鉴于以上现实和理论背景, 本研究聚焦在复杂产品研发过程中由少数研发任务发生技术风险 (事件) 所引发的全局动态属性上. 首先通过识别复杂产品研发项目中技术关联关系构建组织 - 任务相依网络模型. 接下来分析面对技术风险时相依网络中组织任务间相互作用机理, 并构建技术风险扩散动力学模型. 最后针对相依网络重要特征对技术风险扩散的影响展开研究. 研究结论进一步丰富了风险管理理论, 并为研发项目网络架构与优化提供科学建议.

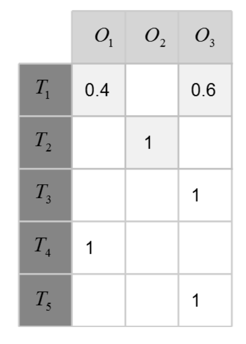
2 基于技术关联的复杂产品研发项目组织 - 任务相依网络模型

研发组织和研发任务 (子产品、组件、包等) 是研发项目中最基本的两类元素. 复杂产品研发项目首先要

完成产品的解构, 形成众多具有功能依赖的研发任务. 接下来, 需要对研发组织进行选择. 在一个复杂产品研发项目中, 一个组织可能承担一项或多项研发任务, 而一项任务也可能由一个或多个组织完成. 由于各组织所承担的任务间存在功能依赖, 因此为确保任务成功研发, 组织间通过技术沟通与协作结成组织网络. 本研究应用设计结构矩阵 (DSM) 和域映射矩阵 (DMM) 方法 [30] 构建复杂产品研发项目组织 - 任务相依网络模型.

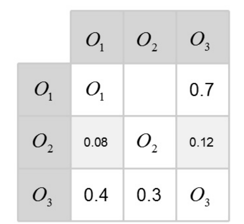
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
T_1	T_1		0.5		0.8
T_2	0.2	T_2			
T_3		0.3	T_3		
T_4			0.5	T_4	0.2
T_5	1				T_5

(a) 任务功能依赖 DSM



	O_1	O_2	O_3
T_1	0.4		0.6
T_2		1	
T_3			1
T_4	1		
T_5			1

(b) 组织 - 任务 DMM



	O_1	O_2	O_3
O_1	O_1		0.7
O_2	0.08	O_2	0.12
O_3	0.4	0.3	O_3

(c) 组织间技术依赖 DSM

图 1 基于 DSM 和 DMM 的组织网络技术依赖关系推导

2.1 任务网络生成

任务间功能依赖关系指的是一个任务的功能发生改变对另外一个任务功能是否造成影响以及影响程度, 可以运用设计结构矩阵 (DSM) 来进行建模. DSM (design structure matrix) 是一种用来表示系统中元素及其相互作用的结构化建模工具, 表示为一个 $N \times N$ 的方阵 (N 为系统中的元素个数). 例如, 某产品研发项目可以分解为 5 项研发任务, 则任务功能 DSM 可以表示为一个 5×5 的方阵, 如图 1(a) 所示. 矩阵的第 i 行表示任务 i 的功能受到哪些任务功能的影响. 矩阵的列 j 表示任务 j 的功能会影响哪些任务的功能. 任务间的功能依赖可以分为单向依赖和相互依赖. 单向依赖指两项任务间只有唯一的依赖方向; 而相互依赖则表示两项任务的功能存在交互. 本研究用 $0 \sim 1$ 的数值来量化依赖度, 数值越大表示依赖关系越强. 在进行产品架构 (product architecture) 时, 通常将具有交互功能的任务置于同一个研发模块中以减少不必要的迭代, 因此复杂产品任务网络是具有模块化特征的有向网络.

2.2 组织任务间执行关联

为高效地完成研发任务, 资源禀赋各异的组织通过团队合作、技术承包等方式参与任务网络中一项或多项任务的研发. 组织技术类型的差异导致任务在组织中的分布状况存在差异. 专业化的研发组织倾向于承担具有相似功能的任务, 而多元化组织承担的各项任务间功能依赖较小. 为了表现组织与任务间执行关联特征, 运用域映射矩阵 (DMM) 描述组织对任务的执行情况. DMM (domain mapping matrix) 是反映一个领域的元素与另一个领域的元素之间对应关系的非正方形矩阵. 如图 1(b) 中所示, 假设有 3 个研发组织执行 5 项任务, 则 DMM 矩阵为一个 5×3 的矩阵, 5 为矩阵的行数, 第 i 行表示任务 i 由哪些组织执行; 3 为矩阵的列数, 第 k 列表示组织 k 执行的所有任务. 在组织任务执行关系中, 由于有某些任务是由多个组织合作研发, 本研究假设该类任务的多个研发组织参与的部分总和等于 1, 如 T_1 由 O_1 和 O_3 合作研发, 此时 O_1 和 O_3 分别执行 T_1 的 40% 和 60%.

2.3 组织网络生成

根据任务功能依赖 DSM 和组织任务执行 DMM, 可以推导出组织间技术依赖 DSM. 组织间的技术依赖主要表现为两种形式. 一种为直接依赖, 一种为间接依赖. 在组织 - 任务 DMM 中, O_1 和 O_3 共同研发 T_1, 此时 O_1 和 O_3 为直接依赖, 表示现实中两个组织共同建立研发机构或团队进行合作研发. 两个组织直接依赖在本质上形成了新的研发组织, 但为了简化模型, 本研究认为直接依赖的组织负责执行任务中一定比例的研发工作, 暂不考虑组织间直接依赖关系强度的测度. 间接依赖指的是组织间因所负责的任务在功能上存在依赖而建立起的技术关联, 如在任务 DSM 中 T_2 的功能依赖于 T_1, 依赖度为 0.2, T_2 由 O_2 研发, T_1 由 O_1 和 O_3 各研发 40% 和 60%, 由于所承担的任务间存在依赖, 因此 O_2 依赖于 O_1 和 O_3. O_2 对 O_1 的依赖度为: $0.2 \times 40\% = 0.08$, O_2 对 O_3 的依赖度为: $0.2 \times 60\% = 0.12$.

因此, 若已知任务 i 与 j 之间的依赖度 $DSM^{\mathrm{T}}(i,j)$、任务 i 与组织 k 之间的依赖度 $DMM(i,k)$ 以及任务 j 与组织 s 之间的依赖度 $DMM(j,s)$, 则组织 DSM 中组织间技术依赖度 $DSM^{\mathrm{O}}(k,s)$ 可由式 (1)[31] 得到:

$$DSM^{\mathrm{O}}(k,s)=\sum_{i=1}^{m}\left(DMM(i,k)\times\sum_{j=1,j\neq i}^{m}\big(DMM(j,s)\times DSM^{\mathrm{T}}(i,j)\big)\right), \tag{1}$$

其中, $i,j=1,2,\cdots,m$; $k,s=1,2,\cdots,n$, m 与 n 分别表示项目中的任务数量和组织数量.

2.4 组织 - 任务相依网络的表示

基于以上分析, 设相依网络中任务网络和组织网络分别为 $g^{\mathrm{A}}(V^{\mathrm{A}},E^{\mathrm{A}}), g^{\mathrm{B}}(V^{\mathrm{B}},E^{\mathrm{B}})$. $V^{\mathrm{A}}=\{1,2,\cdots,m\}$, $V^{\mathrm{B}}=\{1,2,\cdots,n\}$ 分别表示任务节点集合和组织节点集合, $E^{\mathrm{A}}=\{e_{ij}^{\mathrm{A}}\mid i,j\in V^{\mathrm{A}}\}$ 为任务间有向边集合, 此时, $e_{ij}^{\mathrm{A}}=DSM^{\mathrm{T}}(i,j)$ 表示任务 i 的功能对任务 j 的功能的依赖程度, $e_{ij}^{\mathrm{A}}=0$ 表示 i 的功能不依赖于 j; 设 H 为执行关联矩阵, 其中元素 $h_{ik}\in[0,1](1\leqslant i\leqslant m,1\leqslant k\leqslant n)$, 表示组织 k 对任务 i 的执行情况, $h_{ik}=1$ 表示任务 i 由组织 k 独立执行, $h_{ik}=0$ 表示无执行关联, $0<h_{ik}<1$ 表示任务 i 由多个组织合作执行, 此时 $\sum_{k=1}^{n}h_{ik}=1$. $P(H)$ 为执行关联的分布, 控制着组织执行任务数量的分布情况. $E^{\mathrm{B}}=\{e_{ks}^{\mathrm{B}}\mid k,s\in V^{\mathrm{B}}\}$ 为组织间关联边集合, 组织间技术关联强度 $e_{ks}^{\mathrm{B}}=DSM^{\mathrm{O}}(k,s)$.

3 复杂产品研发项目技术风险扩散模型

复杂产品研发项目技术风险往往是由少数研发任务引起的. 当任务发生技术风险 (事件) 时, 其功能实现产生了不确定性. 由于任务间存在功能关联, 对其依赖的任务会以一定概率感染技术风险 [7]. 接下来, 组织因自身感染风险任务数量增加而使得自身技术风险负荷增加. 当组织的风险负荷未超过组织的风险承受能力时, 组织可以投入资源对已感染技术风险的任务进行恢复; 但当组织无法承受其技术风险负荷时, 组织不但无法恢复感染技术风险的任务, 而且会由于执行能力的减弱进一步引起组织内部其他非功能依赖任务发生技术风险 (事件), 进而导致次生技术风险的产生与扩散. 因此, 复杂产品研发项目技术风险受到任务间功能关联和组织任务间执行关联的共同影响.

通过以上分析可以发现, 技术风险在组织 - 任务相依网络上的扩散主要包含两种机制. 一种是任务网络 g^{A} 中功能关联任务间的风险感染, 另一种是任务网络 g^{A} 和组织网络 g^{B} 间的级联失效. 这两种扩散机制可以分别借鉴复杂网络理论中的传染病模型和相依网络级联失效模型进行构建.

3.1 组织 - 任务相依网络中的节点状态

复杂产品研发项目组织 - 任务相依网络中的节点状态是 g^{A} 上的任务节点间的风险传染和 g^{A}、g^{B} 间级联失效的综合. 组织网络中的节点状态包括三种: 健康态 (S)、感染态 (I) 和失效态 (R), 一个组织节点在同一时刻只能处于一种状态. 任务网络中节点状态包括两种: 健康态 (S) 和感染态 (I), 且一个任务节点在任一时刻只能处于一种状态. 组织和任务风险状态的含义如下:

健康状态 (S 态): 对于研发任务来说, S 态表示任务处在正常状态, 未发生技术风险, 而对于研发组织来说, S 态指的是其所承担的所有任务均处于 S 态.

感染状态 (I 态): I 态任务表示已感染了技术风险的任务, 该类任务可以使技术风险向关联任务扩散. I 态任务可以由组织恢复为 S 态. 对于研发组织来说, 当组织执行的任务中至少有一项为 I 态, 且 I 态任务数量尚处在组织可协调的能力范围内时组织为 I 态. I 态组织可以向 S 态和 R 态转变.

失效状态 (R 态): 对于组织来说, R 态表示组织无法继续执行任务. 当组织中 I 态任务积聚到一定数量并超过组织的协调能力时, 组织转变为 R 态.

定义 $y_k(t)$ 表示 t 时刻组织节点 k 的状态, 取值 0, 1, 2, 依次表示节点处在 S 态、I 态和 R 态. 定义 $x_i(t)$ 表示 t 时刻任务节点 i 的状态, 取值 0, 1, 分别代表节点处在 S 态和 I 态.

3.2 技术风险的动态扩散过程

本研究聚焦在由少数任务发生技术风险 (事件) 后引发的相依网络上技术风险扩散特征上. 参与到复杂产品研发项目中的组织往往具有一定的冗余研发能力, 能够有效控制一定程度的技术风险. 因此, 在少数任务

感染技术风险后, 虽然会增加组织的风险负荷, 但通常不会立刻导致组织无法运转, 技术风险会率先在具有功能关联的任务间扩散. 当组织无法及时恢复其内部已感染技术风险的任务时, 组织的风险负荷不断累积, 则可能导致组织的失效, 进而引发组织任务间的级联失效. 基于以上分析, 本研究将组织 - 任务相依网络面对技术风险时的运行状态分为以下四种: 初始状态、g^{A} 内部的技术风险感染、g^{A} 与 g^{B} 间级联失效和扩散终止状态. 四种状态的详细描述及建模过程如下:

1) 初始状态: 设 $t=0$ 时任务网络 g^{A} 和组织网络 g^{B} 中的节点均处在 S 态. $t=1$ 时以概率 p 随机在 g^{A} 中选取少量节点, 设置为 I 态.

2) g^{A} 内技术风险感染: 假设任务 i 转变为 I 态, 则对其功能依赖的任务 j 会以一定概率转变为 I 态. 本研究将这一转变概率定义为技术风险扩散率, 用 v_{ij} 表示. 技术风险扩散率受到任务间功能依赖强度和组织对任务的协调难度的影响 [10,12]. 任务间功能依赖强度越大, 技术风险越容易在任务间扩散; 而组织对任务的协调难度越小, 越有利于遏制技术风险的感染. 因此, 技术风险扩散率与任务功能依赖强度和组织的协调难度均具有正向关系. 考虑到组织在感知、协调内外部任务技术风险上存在明显差异, 因此, 本研究对组织内外部协调难度进行区分. 设 μ 为组织在内部功能关联任务上的协调难度, λ 为不同组织间初始协调难度. 在组织初次合作的情况下, 组织间协调难度往往大于组织内部协调难度, 故设 $0<\mu<\lambda\leq 1$. 因此, 如果 i, j 由同一组织 k 执行, 则技术风险扩散率 $v_{ij}=\mu e_{ij}^{\mathrm{A}}$; 如果 i, j 分别由组织 k, s 执行, 而组织 k 和 s 已经合作了 w 次, 则 $v_{ij}=\lambda_{ks}e_{ij}^{\mathrm{A}}$, 其中 λ_{ks} 为组织 k 与组织 s 在第 $w+1$ 次合作时的协调难度. 两个组织间的协调难度随着组织间技术关联强度的增大以及合作次数的增加而减小. 这是因为组织间技术关联越强, 则技术沟通频率越高、强度越大, 越容易感知到外界技术风险, 从而降低协调难度; 合作次数越多, 越容易形成协作惯例, 组织间协调难度越小 [32,33]. 综合考虑以上两个因素, 设 $\lambda_{ks}=\lambda(1-e_{ks}^{\mathrm{B}})^{w_{ks}}$. 其中, w_{ks} 为组织 k 和 s 的合作次数, e_{ks}^{B} 为组织间技术关联强度. 如果组织 k 与组织 s 为初次合作, 则 $\lambda_{ks}=\lambda$. 如果非初次合作, 则 $\lambda_{ks}<\lambda$. 综上, 任务 i, j 间风险扩散率为:

$$v_{ij}=\begin{cases}\mu e_{ij}^{\mathrm{A}}, & h_{ik}\neq 0\wedge h_{jk}\neq 0,\\ \lambda_{ks}e_{ij}^{\mathrm{A}}, & h_{ik}=0\vee h_{jk}=0.\end{cases} \tag{2}$$

3) g^{A} 与 g^{B} 间级联失效: 任务的执行和恢复依赖组织的执行能力和恢复能力, 反过来, 组织的执行能力和风险恢复能力也受到任务风险状态的影响. t 时刻, 如果任务 i 为 I 态, 其执行组织 k 需要投入一定的资源对其进行恢复. 随着组织中 I 态任务的增多, 风险恢复资源不断减少, k 的恢复能力不断下降, 且当组织内部 I 态任务的数量超过 k 能承受的极限, 就会导致组织 k 转化为 R 态. 为了描述这一过程, 本研究用 t 时刻末组织中 I 态任务的密度表示组织此时的风险负荷:

$$\rho_k(t)=n_k^{\mathrm{I}}(t)/n_k. \tag{3}$$

其中 $n_k^{\mathrm{I}}(t)=\sum_{i\in K}x_i(t), K=\{l\mid h_{lk}>0, l=1,2,\cdots,m\}$, 表示 t 时刻组织 k 中 I 态任务的数量, n_k 为组织 k 执行的任务总数. 在风险管理实践中, 组织技术风险恢复能力受到上一时刻组织的技术风险负荷状况的影响. $t-1$ 时刻组织的风险负荷越大, 则占用的组织风控资源越多, 组织在 t 时刻的风险恢复能力越弱. 设组织 k 在 t 时刻的技术风险恢复能力为 $\tau_k(t)$, 利用 S 型函数来表示 $\tau_k(t)$:

$$\tau_k(t)=\gamma\mathrm{e}^{-\alpha\rho_k(t-1)}. \tag{4}$$

式中 γ 为组织投入的技术风控资源总量, 其值与组织的技术风险恢复能力正相关. α ($\alpha\geq 1$) 为组织的风险负荷敏感度, 表示组织风控能力受上一时刻风险负荷影响的程度. α 越大, 组织风险负荷的负向影响越大. 在 $t=0$ 时刻, 技术风险 (事件) 尚未发生, 组织 k 的风险负荷 $\rho_k(0)=0$. 因此组织在 $t=1$ 时刻的风险恢复能力 $\tau_k(1)=\gamma$. 当 $t>1$ 时, $\tau_k(t)$ 与 $\rho_k(t-1)$ 呈反方向变化, 当 $\rho_k(t-1)>0$ 时, 如果 $\alpha\to+\infty$, 则 $\mathrm{e}^{-\alpha\rho_k(t-1)}\to 0$, 因此 $\tau_k(t)\to 0$, 此时组织对任务技术风险的恢复能力极低, 任务难以恢复.

由于组织的风险负荷由组织中感染技术风险的任务密度来测度, 因此定义组织的抗风险阈值为组织能够承受的风险负荷的最大值, 用 ρ_k^* 表示. 因此, 组织状态的转化公式可以表示如下:

$$y_k(t)=\begin{cases}0, & \rho_k(t)=0,\\ 1, & 0<\rho_k(t)\leq\rho_k^*,\\ 2, & \rho_k(t)>\rho_k^*.\end{cases} \tag{5}$$

如果组织转化为 R 态, 则组织所执行的任务中 I 态任务将难以恢复, 且其他 S 态的任务也因失去组织的支撑而转变为 I 态. 综上所述, 运用执行任务的感染密度 $\rho_k(t)$ 对组织风险负荷进行表征的方式将组织和任务的风险状态联系在一起. 因此, 可以通过相依网络中组织节点的失效状况来表示技术风险对相依网络运行状态的影响. 定义 $I(t)$ 为 t 时刻末相依网络中组织节点的失效比例, 公式为:

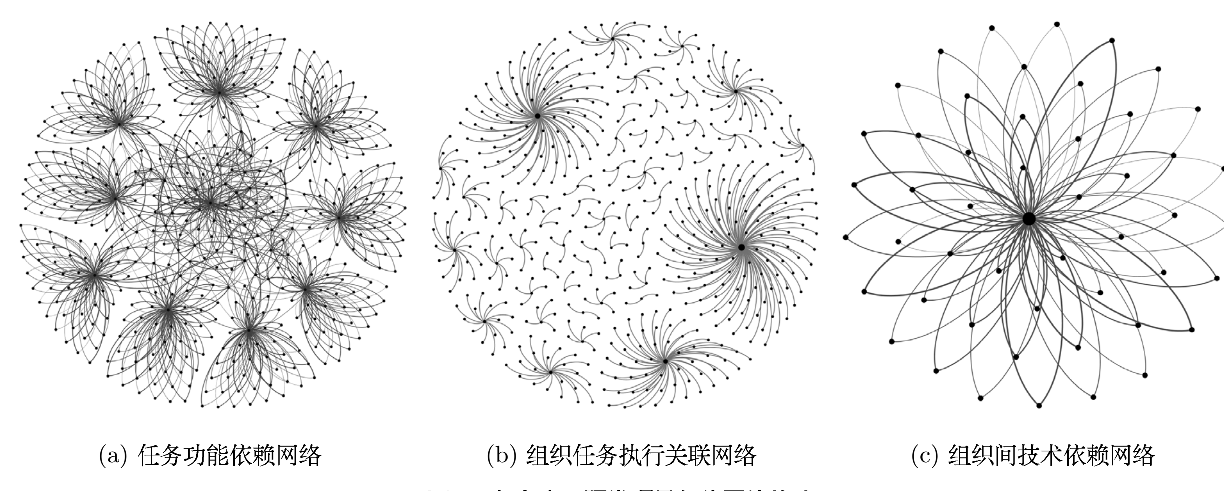
$$I(t) = \mathrm{Card}(y_k(t) == 2)/n \tag{6}$$

式中 $\mathrm{Card}(y_k(t) == 2)$ 表示网络中失效组织的数量, 如果 $I(t)$ 的值越接近于 1, 则意味着 t 时刻末相依网络处于瘫痪状态; 如果 $I(t)$ 接近于 0, 则说明相依网络越接近健康运行状态.

4) 扩散终止: 当网络中组织的失效比例 $I(t)$ 达到相对稳态时, 扩散终止. 设扩散终止时 $I(t)$ 收敛于 I^*, 本研究用 I^* 来衡量相依网络上技术风险的扩散后果.

4 仿真及结果分析

假设某复杂产品研发项目可以分解为 500 个研发任务, $m = 500$, 根据现实中的复杂产品项目中研发任务功能关联的特点, 生成由 10 个主要功能模块构成的有向任务网络, 如图 2(a) 所示.



(a) 任务功能依赖网络　(b) 组织任务执行关联网络　(c) 组织间技术依赖网络

图 2 复杂产品研发项目相依网络构建

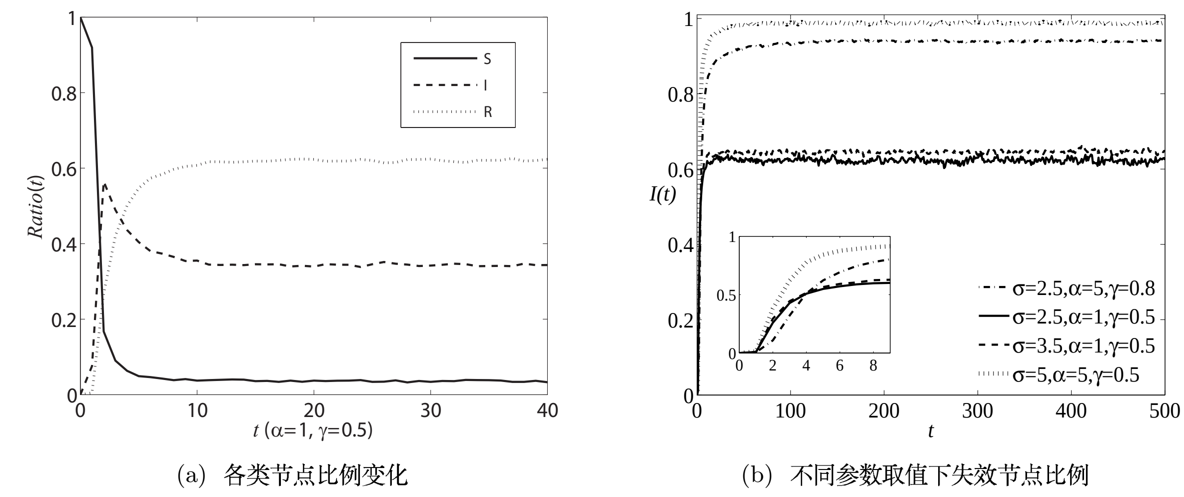
现实中复杂产品研发项目进行组织选择时往往采用边分解边选择的方式,承包任务的组织对任务进行分解, 并将其中一部分任务分包出去. 为任务寻找执行组织的过程可以看作是组织寻找合作伙伴的过程. 在这个过程中, 大多数学者认为组织具有择优选择意识, 会选择网络中已有信誉较好或占据网络有利位置的组织合作, 最终造成少数优势组织在项目中承担较多的研发任务 [34,35]. 基于此, 本研究假定组织任务间执行关联为择优关联, 并设组织执行任务的数量服从指数为 σ 的幂律分布. 以组织规模 $n = 50$, 分布指数 $\sigma = 2.5$ 为例, 得到执行关联网络如图 2(b) 所示. 进而推导出的组织间的技术依赖网络如图 2(c) 所示. 可以看出, 当执行关联服从指数为 2.5 的幂律分布时, 组织间技术关联网络呈现星型特征. 接下来对复杂产品研发项目技术风险扩散特征进行研究.

根据研发网络现实特点, 本研究固定组织内外部协调难度 $\mu = 0.1$, $\lambda = 1$, 任务网络初始失效比例 $p = 1\%$, 并设组织间的合作次数 w 服从 0∼3 之间的整数均匀分布, 组织的抗风险阈值 $\rho_k^* \sim U(0, 1)$. 所有结果均经过 100 次仿真求均值.

4.1 复杂产品研发项目技术风险扩散基本特征

复杂产品研发过程中, 少数任务发生技术风险 (事件) 的现象出现频率较高, 揭示其对全局研发网络的影响对技术风险控制具有重要意义. 因此, 本研究针对不同参数进行取值, 观察由少数任务引发的技术风险扩散特征, 结果如图 3 所示. 图 3(a) 以 $\sigma = 2.5$、$n = 50$ 为例展示了当 $\alpha = 1$, $\gamma = 0.5$ 时相依网络中各类节点比例随时间变化的情况, $Ratio(t)$ 表示 t 时刻末分别处在 S 态、I 态和 R 态的组织比例.

由图 3(a) 可以看出, 随机选取的 5 项任务 $(m \times p)$ 所引发的相依网络技术风险扩散可以在短时间内引发大规模组织失效. 失效的 R 态节点比例在第 12 个周期末达到相对稳态值 62%. 技术风险扩散过程可以分



(a) 各类节点比例变化 (b) 不同参数取值下失效节点比例

图 3 相依网络技术风险扩散过程

为三个主要阶段: 1) 缓慢扩散. 此阶段主要为第 1 个演化周期. 网络中少数任务发生技术风险事件, 并导致小范围内的关联任务感染技术风险. S 态组织节点比例下降 8%, I 态和 R 态节点比例分别上升 7.6% 和 0.4%, 此时技术风险影响范围较小; 2) 失控扩散. 随着网络中感染风险任务数量的增加, 一部分组织因风险负荷超过自身抗风险阈值而失效, 进而导致组织执行的其他非功能关联任务感染技术风险, 从而引发次生技术风险. 此阶段经历 11 个演化周期, 可以进一步分为两个子阶段, 第一个子阶段 ($t=1\sim2$) 中, I 态组织的比例快速增长, 到达最大值 57%, 第二个子阶段 ($t=3\sim12$) 中由于 I 态组织风险负荷不断上涨发生聚集效应, 导致大量节点迅速失效, R 态节点比例上涨到 62%; 3) 相对稳定阶段. 网络中不同状态的组织比例达到相对稳态, S 态、I 态和 R 态组织比例均值分别为 3%, 35% 和 62%. 图 3(b) 列举了在不同参数取值下失效节点比例的变化情况, 说明了在不同情境下扩散均会经历以上三个阶段. 因此, 在技术风险的管理实践中, 管理者应该提高对技术风险的实时监控能力, 尽早对率先出现任务失效的组织加大资源投入, 尽量在第一个阶段将技术风险消除, 以免引发次生技术风险, 导致技术风险失控扩散. 图 3(b) 的结果还说明, 组织执行关联特征、组织恢复能力等因素是影响相依研发网络技术风险扩散特征的潜在因素. 因此, 接下来本研究将探讨这些潜在因素的影响.

4.2 组织网络规模和执行关联均匀度的影响

当任务网络规模一定时, 组织网络的规模 n 决定了组织执行任务的平均数量. 而组织与任务执行关联的分布情况则影响任务在组织中分布的均匀程度. 两个因素较为完整的表现了执行关联的特点. 因此, 本研究从组织网络规模 n 和关联分布 $P(H)$ 两个方面研究执行关联对相依网络技术风险扩散的影响.

图 4 展示了 $n=50$ 时在 σ 三组取值下组织执行任务的分布情况. 可以看出, 当 σ 分别为 2.5, 3.5 和 5 时, 50 个组织中执行任务最多的组织的任务量由 113 下降到 20. 说明 σ 的值越大, 任务在组织网络中的分布越均匀. 在任务网络一定的情况下, 组织间关联方式与强度随着任务分布均匀度的变化而变化, 通过影响组织面对技术风险的沟通和协调行为, 影响技术风险的扩散过程. 随着组织网络规模的增长, 受到 σ 的影响, 一些能力较差的组织只能承担单个任务中一定比例的研发任务. 为了观察组织网络规模对相依网络技术风险扩散的影响, 在 $[10,500]$ 范围内对 n 间隔 10 进行取值, 并对 I^* 进行统计, 结果如图 5 所示.

从图 5 可以看出, 不论执行关联的均匀性如何, 风险后果指标 I^* 先是随着 n 的增加急剧上升, 到达最高点后逐渐下降, 二者呈现近似的 "倒 U" 型关系. 当组织网络规模较小时, 组织平均执行的任务数量较多, 相依研发网络技术风险扩散主要表现为组织内部风险扩散. 由于组织内部风险协调难度较小, 组织可以有效抑制风险的扩散并恢复已发生技术风险的任务. 同时, 组织数量较少时, 组织间关联任务增多, 组织间协调能力增强, 降低了技术风险扩散的可能性. 随着网络规模的增大, 组织承担的平均任务数量逐渐减少, 技术风险的内部扩散与外部扩散同时进行, 加快了风险扩散的速度与范围. 而当组织规模较大时, 组织平均承担的任务数量减少, 任务感染风险对执行组织的影响较大, 极有可能导致组织失效, 但是组织失效后引发的次生技术风险扩散规模较小, 最终导致有限范围的风险扩散.

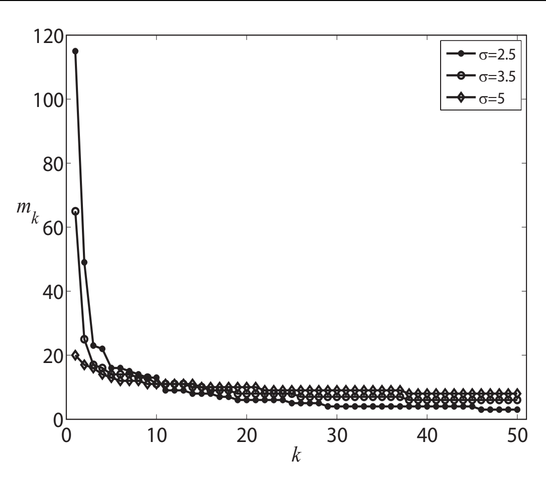


图 4　不同 σ 值对应的组织 k 执行任务数量分布

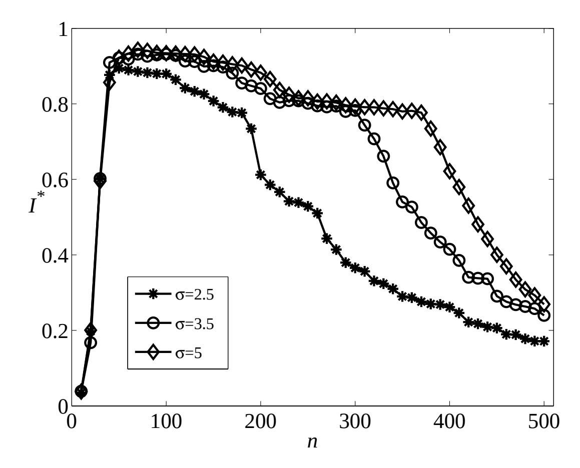


图 5　不同 σ 下 I^* 与组织网络规模 n 的关系

从图 5 中三类执行关联的仿真结果可知, 在 $n \leq 40$ 时, σ 对风险后果指标 I^* 的影响几乎无差异, n 为其余值时, I^* 随着 σ 的增大而增大. 这说明, 在组织网络达到一定规模时, 执行关联分布越均匀, 相依研发网络在面对少数任务引起的技术风险扩散时的鲁棒性越差. 综上, 从技术风险控制的角度来看, 在选择关联任务的执行单位时, 应选择研发能力较强的组织, 尽量由较少的组织集中研发功能依赖较强的任务. 这在一定程度上验证了组织模块化研发形式的优越性.

4.3　风险恢复参数 α 和 γ 的影响

在面对技术风险时, 组织的主要作用之一是采取风险控制措施对感染技术风险的任务进行恢复. 参数 α 控制组织对技术风险负荷的敏感程度, α 越大, 表示组织受到风险负荷的影响越大, 恢复 I 态任务的能力越差. 参数 γ 表示组织的风险恢复资源投入量, 其值越大表示组织的技术风险恢复能力越强. 当风险恢复资源投入足够多时, I 态任务会以最快的速度恢复为 S 状态, 但资源的投入受到研发成本的限制, 并非越多越好. 因此有必要研究参数 α 和 γ 对 I^* 的影响, 寻找最佳资源投入程度. 设 $n = 50$, $\sigma = 2.5$, 同时分别设 α 的值为 5、10、100, 在 α 的三种取值下 I^* 随 γ 值增大的变化情况如图 6 所示.

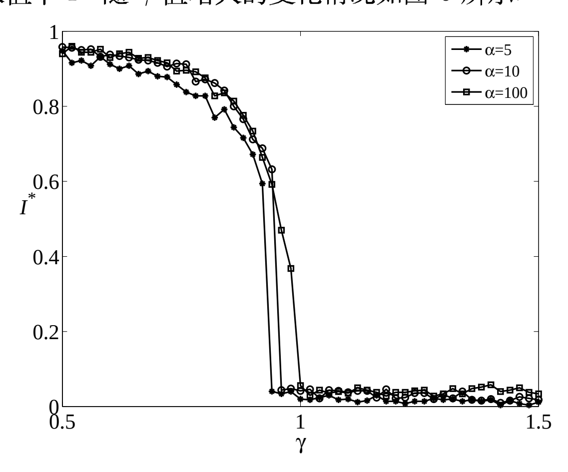
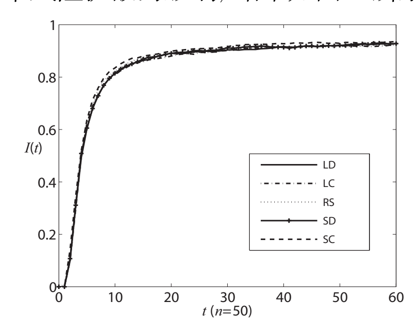


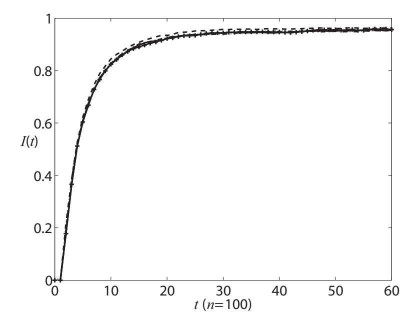
图 6　不同 α 下 I^* 与资源投入量 γ 的关系

从图 6 可以看出, 在 α 的三种取值下, 风险后果指标 I^* 先是随参数 γ 的增加缓慢下降, 当达到某一临界值 γ^* 后便稳定在一个最低水平. 随着 α 的增大, 这一临界值逐渐增大, 这说明在不同的 α 下, 风险资源的投入存在最佳水平. 当 α 值分别为 5、10、100 时, γ^* 的值分别为 0.97、0.98 和 1, I^* 最终稳定在 0.5%、1%、3% 左右. 这说明, 组织对负荷的敏感度 α 与资源投入临界值 γ^* 成正相关, 与恢复水平成负相关. 当网络中组织的负荷敏感度较高时, 应投入更多的资源进行风险恢复. 也说明技术风险 (事件) 发生后进行的风险恢复难以彻底消除风险, 只能尽量控制风险保持在较低水平. 因此, 应重视技术风险的预防工作, 减小技术风险发生的可能.

4.4 袭击策略的影响

上述仿真过程中, 初始感染技术风险的任务均是随机选取的. 事实上, 复杂网络中节点的重要度通常具有差异, 因此相关研究通常采用随机袭击和蓄意袭击对网络中的节点进行破坏, 试图找出对网络整体鲁棒性影响更大的节点进行保护 [36,37]. 因此, 本研究根据任务网络有向性特点研究基于任务网络出度特征的五种袭击策略对相依网络技术风险扩散的影响, 分别为: 1) 袭击网络中出度最大的节点 (简称 LD 策略), 2) 袭击网络中出度最小的节点 (简称 SD 策略), 3) 随机策略 (简称 RS 策略), 4) 袭击网络中出度强度总和最大的节点, 该节点实际意义为任务网络对其他任务产生最大功能支撑的任务 (简称 LC 策略), 5) 袭击出度强度总和最小的任务 (简称 SC 策略). 前文研究结论可知, 组织规模对技术风险扩散具有重要影响, 因此分别选取 $n=50$、$n=100$、$n=400$, 并设 $\alpha=5$, $\gamma=0.8$, 考察初始发生技术风险 (事件) 的任务在网络中的位置对技术风险扩散的影响, 结果如图 7 所示.





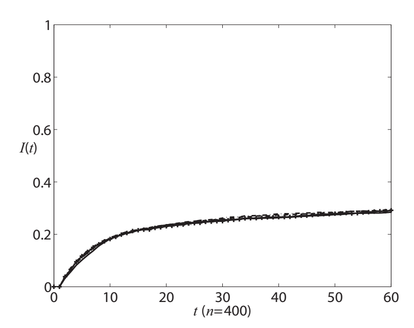


图 7 不同袭击策略对技术风险扩散过程的影响

可以看出, 组织规模相同时, 不论采取何种袭击策略, 相依网络中技术风险扩散过程均显示出相似的特征. 这说明, 即使是任务网络中关联数量最小和关联强度最弱的任务, 当其感染技术风险后, 如果不能及时地恢复, 对相依网络造成的破坏与关联数量最大、关联强度最强的任务相当, 甚至能够导致网络中多数组织的失效. 因此, 网络管理者和个体组织管理者应加强对功能重要度较低的任务的监管, 完善各级技术风险预警机制, 在技术风险发生后及时进行恢复, 防止技术风险在组织内外的蔓延.

5 结语

本研究基于技术关联构建了复杂产品研发项目组织 - 任务相依网络模型和技术风险扩散动力学模型, 并运用仿真的方法针对由少数任务引发的技术风险扩散及关键因素的影响展开研究. 研究结果表明: 1) 少数任务引发的技术风险扩散会在短时间内造成较大影响, 扩散过程经历缓慢扩散, 失控扩散, 最终达到相对稳定状态; 2) 组织网络规模是影响技术风险扩散特征的重要因素, 技术风险扩散范围与组织规模呈近似的 "倒 U" 型关系; 3) 组织网络规模一定时, 任务在组织网络上分布越均匀, 相依研发网络鲁棒性越差; 4) 针对不同的负荷敏感度 α, 存在最佳风险恢复资源投入量 γ^*, 使得技术风险对网络的破坏降到最低水平, 但技术风险难以通过个体组织风控行为彻底消除; 5) 任务网络中节点重要度没有明显区别, 如不及时进行恢复均会引发研发网络全局反应. 本研究丰富了研发网络风险扩散动力学理论, 对提高复杂产品研发项目的抗风险能力提供建议.

参考文献

[1] 苏越良, 张卫国. 基于全局的复杂产品开发项目风险协调控制方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(5): 70–76.
Su Y L, Zhang W G. Study on a risk coordination control method based on overall situation for complex product development project[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2008, 28(5): 70–76.

[2] Hobday M. Product complexity, innovation and industrial organisation[J]. Research Policy, 1998, 26(6): 689–710.

[3] Gokpinar B, Hopp W J, Iravani S M R. The impact of misalignment of organizational structure and product architecture on quality in complex product development[J]. Management Science, 2010, 56(3): 468–484.

[4] Baum J A C, Cowan R, Jonard N. Network-independent partner selection and the evolution of innovation networks[J]. Management Science, 2010, 56(11): 2094–2110.

[5] Kendrick P T. Identifying and managing project risk: Essential tools for failure-proofing your project[M]. 3rd

ed. AMACOM, 2009.

[6] 陈明. 复杂产品研发的技术风险分析与应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
Chen M. Analysis and application research on technical risk of complex product development[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.

[7] Christos E. The domino effect: An empirical exposition of systemic risk across project networks[J]. Production & Operations Management, 2010, 56(11): 2094–2110.

[8] Sosa M E. Realizing the need for rework: From task interdependence to social networks[J]. Production & Operations Management, 2015, 23(8): 1312–1331.

[9] Ellinas C, Allan N, Johansson A. Project systemic risk: Application examples of a network model[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 182: 50–62.

[10] 杨青, 郑璐, 索尼亚. 研发项目中 "团队 - 产品 - 功能" 多领域集成与组织聚类研究 [J]. 系统工程理论实践, 2018, 38(6): 1557–1565.
Yang Q, Zheng L, Sonia K. Multi-domain integration of team-product-function and organization clustering in product development project[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2018, 38(6): 1557–1565.

[11] Fu Y, Li M, Chen F. Impact propagation and risk assessment of requirement changes for software development projects based on design structure matrix[J]. International Journal of Project Management, 2012, 30(3): 363–373.

[12] 杨青, 刘志林, 单晨. 研发项目中重叠活动间沟通对返工风险的影响分析与优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(9): 2384–2393.
Yang Q, Liu Z L, Shan C. The impact analysis and optimization of communication on rework risk between overlapped activities in R&D projects[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2017, 37(9): 2384–2393.

[13] Kutsch E, Hall M. Intervening conditions on the management of project risk: Dealing with uncertainty in information technology projects[J]. International Journal of Project Management, 2005, 23(8): 591–599.

[14] 陈明, 林桂娟. 复杂产品研发技术风险管理研究与应用 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2009, 37(8): 1090–1095.
Chen M, Lin G J. Technical risk management and application of complex product development[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(8): 1090–1095.

[15] Zhang Y L, Yang N D. Research on robustness of R&D network under cascading propagation of risk with gray attack information[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2013, 117: 1–8.

[16] 张延禄, 杨乃定. R&D 网络风险相继传播模型构建及仿真 [J]. 系统工程理论实践, 2014, 34(3): 723–731.
Zhang Y L, Yang N D. Risk cascading propagation modeling and simulation in R&D network[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(3): 723–731.

[17] Zhang Y L, Yang N D. Development of a mitigation strategy against the cascading propagation of risk in R&D network[J]. Safety Science, 2014, 68: 161–168.

[18] 铁瑞雪, 杨乃定, 张延禄, 等. R&D 网络技术风险传播模型构建及仿真 [J]. 管理工程学报, 2018, 32(3): 188–194.
Tie R X, Yang N D, Zhang Y L, et al. Modeling and simulation of technical risk propagation in R&D network[J]. Journal of Industrial Engineering/Engineering Management, 2018, 32(3): 188–194.

[19] 杨青, 单晨, 唐尔玲. 基于返工风险传播和预处理的研发项目流程 DSM 优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(6): 1501–1508.
Yang Q, Shan C, Tang E L. Optimization of design structure matrix in complex R&D projects based on rework risk propagation and pretreatment[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2015, 35(6): 1501–1508.

[20] Wang J B, Yang N D, Zhang Y L, et al. Development of the mitigation strategy against the schedule risks of the R&D project through controlling the cascading failure of the R&D network[J]. Physica A: Statistical Mechanics & its Applications, 2018, 508: 390–401.

[21] 张延禄, 杨乃定. 基于组织 - 任务网络的研发项目工期风险分析 —— 以组织失效为风险因素 [J]. 中国管理科学, 2015, 23(2): 99–107.
Zhang Y L, Yang N D. Analysis of R&D project schedule risk based on the organization-task network: With the organization failure as a risk factor[J]. Chinese Journal of Management Science, 2015, 23(2): 99–107.

[22] 杨靖, 陈英武, 沈永平. 基于相互作用网络的大型工程项目组织结构风险分析 [J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(10): 1966–1973.
Yang Q, Chen Y W, Shen Y P. Interdependent network based risk analysis of organizational structures for large-scale engineering project[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2011, 31(10): 1966–1973.

[23] Gong J, Mitchell J E, Krishnamurthy A, et al. An interdependent layered network model for a resilient supply chain[J]. Omega, 2014, 46(9): 104–116.

[24] Buldyrev S V, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks[J]. Nature, 2010, 464(7291): 1025–1028.

[25] Hu Y, Ksherim B, Cohen R, et al. Percolation in interdependent and interconnected networks: Abrupt change from second- to first-order transitions[J]. Physical Review E: Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2011, 84(6): 066116.

[26] Bashan A. Percolation in networks composed of connectivity and dependency links[J]. Physical Review E: Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2008, 83(5): 051127.

[27] Dong G, Gao J, Tian L, et al. Percolation of partially interdependent networks under targeted attack[J]. Physical Review E: Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2012, 85(1): 016112.

[28] Parshani R, Rozenblat C, Ietri D, et al. Inter-similarity between coupled networks[J]. EPL, 2010, 92(6): 68002.

[29] Korhonen T, Laine T, Martinsuo M. Management control of project portfolio uncertainty: A managerial role perspective[J]. Project Management Journal, 2014, 45(1): 21–37.

[30] 杨青, 吕佳芮, 索尼亚. 基于设计结构矩阵 (DSM) 的复杂研发项目建模与优化研究进展 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(4): 989–1002.
Yang Q, Lü J R, Kherbachi S. Progress in modeling and optimization for complex R&D project based on design structure matrix[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(4): 989–1002.

[31] 杨青, 唐尔玲. 研发项目产品与流程架构的跨领域集成与优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1525–1532.
Yang Q, Tang E L. Cross-domain integration and optimization of the process and product architecture in product development projects[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2014, 34(6): 1525–1532.

[32] Aaltonen K, Ahola T, Artto K. Something old, something new: Path dependence and path creation during the early stage of a project[J]. International Journal of Project Management, 2017, 35(5): 749–762.

[33] 刘景东, 杜鹏程. 惯例视角下联盟管理能力的构成及其对联盟组合绩效的影响研究 [J]. 管理评论, 2015, 27(8): 150–162.
Liu J D, Du P C. The construct of alliance management ability and its influence on alliance portfolio performance from the view of routines[J]. Management Review, 2015, 27(8): 150–162.

[34] Tomasello M V, Napoletano M, Garas A, et al. The rise and fall of R&D networks[J]. Industrial and Corporate Change, 2017, 26(4): 617–646.

[35] Biggiero L, Angelini P P. Hunting scale-free properties in R&D collaboration networks: Self-organization, power-law and policy issues in the European aerospace research area[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2015, 94: 21–43.

[36] Tang L, Jing K, He J, et al. Robustness of assembly supply chain networks by considering risk propagation and cascading failure[J]. Physica A: Statistical Mechanics & its Applications, 2016, 459: 129–139.

[37] Tang L, Jing K, He J, et al. Complex interdependent supply chain networks: Cascading failure and robustness[J]. Physica A: Statistical Mechanics & its Applications, 2016, 443: 58–69.